干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

银川平原降水氢氧稳定同位素时间尺度效应及水汽来源

高 阳[1]， 韩 磊[1,2,3]， 韩永贵[1]， 黄晓宇[1]， 彭 苓[4]， 柳利利[1]

（1. 宁夏大学地理科学与规划学院，宁夏 银川 750021；2. 中阿旱区特色资源与环境治理国际合作联合实验室，宁夏 银川 750021；3. 宁夏旱区资源评价与环境调控重点实验室，宁夏 银川 750021；4. 宁夏大学农学院，宁夏 银川 750021）

摘 要：为揭示银川平原降水稳定同位素的时间尺度效应及水汽来源，采用后向轨迹模型聚类分析法、潜在源贡献分析法（PSCF）和浓度权重轨迹分析法（CWT）解析水汽来源及潜在蒸发源区。结果表明：（1）银川平原降水氢氧稳定同位素组成存在明显的季节性变化，冬半年降水氢氧稳定同位素组成（−38.6‰±51.6‰和−4.5‰±5.2‰）明显偏正于夏半年（−40.9‰±17.7‰和−5.7‰±3.0‰）；不同时段下，局地大气降水线（LMWL）具有显著差异，夏半年LMWL的斜率、截距（5.43、−9.71）低于冬半年的斜率、截距（9.10、5.08）和银川平原全年LMWL的斜率、截距（6.79、−2.79）。（2）在全年、夏半年和冬半年，降水中$\delta^{18}O$的气温效应显著，气温效应分别为（0.473±0.210）‰·℃$^{-1}$、（0.258±0.037）‰·℃$^{-1}$和（0.211±0.031）‰·℃$^{-1}$，降水量效应不显著。（3）在夏半年和冬半年，研究区降水的水汽来源主要为西风水汽，同时受局地蒸发水汽的影响。夏半年，水汽蒸发源区主要分布在研究区周边地区及西部、西南部和南部；冬半年主要分布在研究区周边地区和西部。研究结果可为干旱地区利用稳定同位素技术鉴别水汽来源方法的选择提供理论依据。

关 键 词：大气降水；稳定同位素效应；水汽来源；潜在蒸发源区；不同时间尺度；银川平原
文章编号：

银川平原地处我国西北干旱区，水资源是影响和制约该地区高质量发展和生态建设的关键因素[1]。降水是水循环过程中的一个重要环节，研究降水稳定同位素的时间尺度效应，可有效示踪区域水汽来源，定量阐明降水在水循环过程中的分配和转化[2-4]，对进一步了解该区域水循环过程具有重要意义。

降水氢氧稳定同位素组成受气温、降水量和水汽来源等因素的影响，随时间、地区和大气环流条件而发生变化[5-7]。Gui等[2]对青藏高原与干旱区过渡区降水稳定同位素的环境效应及时空格局进行了研究，发现降水中$\delta^{18}O$的气温效应为0.47‰，在夏季降水量的影响明显；Salamalikis等[8]利用浓度权重轨迹分析法（CWT）结合气象及水汽氘盈余（*d*-excess）数据，分析了希腊帕特雷地区的水汽源区，进一步得出水汽的潜在蒸发源区主要位于地中海盆地中部地区；孟鸿飞等[9]利用TrajStat软件中的后向轨迹模型（HYSPLIT）和潜在源贡献分析法（PSCF），对黑河上游夏季降水的潜在蒸发源区进行了研究。现有关于银川平原降水中稳定同位素的研究[3,10]，主要基于IAEA/WMO监测网中银川站点的月平均降水稳定同位素数据，但受限于监测站点数量和数据时效性，还不能完全了解降水中稳定同位素的环境效应和水汽来源。同时，由于研究区地处我国西北季风边缘区，降水氢氧稳定同位素组成特征不完全同于西北其他干旱地区，并且水汽的蒸发源区也还不清楚。

本文基于在银川平原银川和灵武2个站点实际监测的日降水氢氧同位素和相应气象数据，对全年、夏半年和冬半年不同时段下降水中稳定同位素

收稿日期：2021-03-11； **修订日期**：2021-08-24
基金项目：国家自然科学基金（31760236，31460220）资助
作者简介：高阳（1994-），男，硕士研究生，主要从事同位素水文等方面的研究. E-mail: gao15121994088@163.com
通讯作者：韩磊（1985-），男，研究员，主要从事干旱区生态水文过程等方面的研究. E-mail: layhan@163.com

的变化特征、局地大气降水线、气温和降水量效应进行了分析和比较，并探讨了该地区降水的水汽来源及潜在蒸发源区，以期为今后研究西北干旱区局地水循环过程提供参考，同时提供可行的水汽来源鉴别方法。

1 研究区概况

银川平原位于黄土高原中部西侧（图1），属于温带大陆性半干旱气候[11]，多年平均气温为8.8 ℃，利用E601型蒸渗仪测得多年平均蒸发量为1800 mm，多年平均降水量为209.7 mm。降水年内分配不均，主要集中在6—9月，约占多年平均降水量的72.4%（数据来自国家气象信息中心-中国气象数据网提供的中国地面气象站逐小时观测资料2010—2018年数据）。

2 数据与方法

2.1 样品采集与测定

本文在银川市宁夏大学贺兰山校区（38°30′05″N，106°08′34″E；海拔1120 m）和银川市灵武市白芨滩国家级自然保护区内（38°03′34″N，106°22′03″E；海拔1130 m）2个站点进行事件尺度的大气降水样品采集，降水样品明细见表1。按照《大气降水样品的采集与保存》（GB/T13580.2-1992）[12]，在降水日的08:00和20:00对降水量≥0.1 mm的降水分别进行1次采样，二者的降水量之和记为该日的总降水量。在银川站点，为减少建筑物等其他可能污染源对降水样品产生影响，将2个标准雨量筒（直径20 cm圆桶上放置漏斗，下端与雨量筒相连，漏斗内放置乒乓球防止蒸发）置于楼顶；在灵武站点，将标准雨量筒置于无林空旷地内。每次降水结束后，将收集到的液态降水立即注入30 mL的聚乙烯采样瓶中，并用Parafilm封口膜密封；降雪样品先装入水样袋中，密封袋口，待其在室温下完全融化后装入30 mL的聚乙烯采样瓶中密封。所有采集的降水样品带回实验室后经0.45 μm的混合纤维滤膜过滤后置于冰箱中（4 ℃左右）冷藏保存待测。

所有采集的降水样品利用液态水同位素分析仪（Los Gatos Research，DLT-100，USA）进行测定（$\delta^{18}O$和δD的测定精度分别为±0.1‰和±0.4‰）。测定结果的有效位数符合张自超等[13]对稳定同位素分析结果的有效位数规则并以相对于维也纳标准平均海洋水（Vienna standard mean ocean water，V-SMOW）

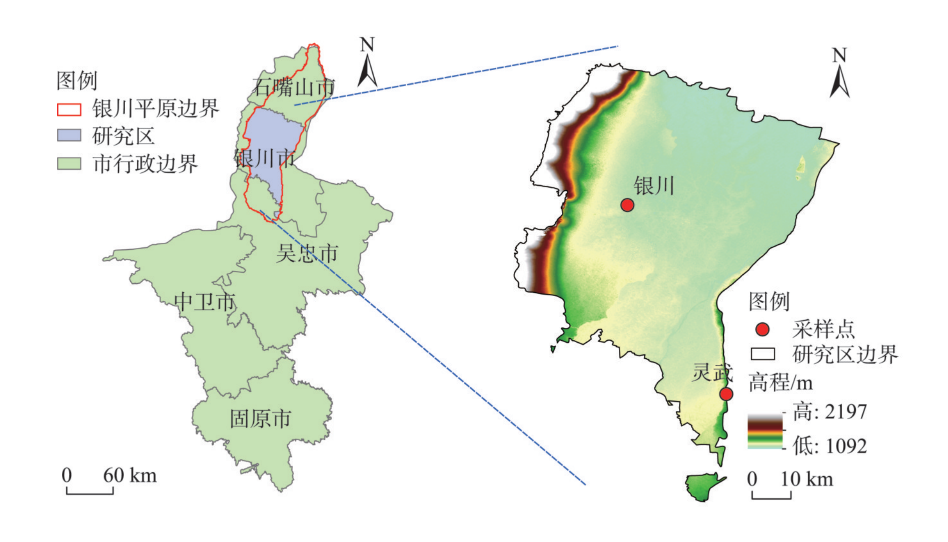


图1 银川平原及采样点分布

Fig. 1 Distribution of Yinchuan Plain and samplings points

表1 银川平原各站点数据

Tab. 1 Data of the sampling sites in Yinchuan Plain

采样点	δD年均值/‰	$\delta^{18}O$年均值/‰	氘盈余（*d*-excess）年均值/‰	平均气温/℃	降水量/mm	平均相对湿度/%	降水样品/个
银川	-29.4	-3.0	-5.7	18.93	101.5	63.85	17
灵武	-33.8	-4.9	5.0	20.84	113.7	70.40	19

的千分差表示：

$$\delta D(或\delta^{18}O)=\frac{R_{sample}-R_{V\text{-}SMOW}}{R_{V\text{-}SMOW}}\times 1000‰ \quad (1)$$

式中：R_{sample}和$R_{V\text{-}SMOW}$分别表示降水样品和维也纳标准平均海洋水中重轻同位素丰度之比(‰)。Dansgaard[14]定义了氘盈余(*d*-excess)，可以示踪降水的水汽来源，表示为：

$$d\text{-}excess=\delta D-8\times\delta^{18}O \quad (2)$$

水汽中氢氧稳定同位素日值由对应的次降水中氢氧稳定同位素日值换算得到[15]，公式为：

$$\delta^{18}O_{PV}=\delta^{18}O_P-10^3\left(\alpha^{18}_{w\text{-}v}-1\right) \quad (3)$$

$$\delta D_{PV}=\delta D_P-10^3\left(\alpha^{2}_{w\text{-}v}-1\right) \quad (4)$$

式中：$\delta^{18}O_{PV}$和δD_{PV}为水汽中氢氧稳定同位素日降水量加权平均值(‰)；$\delta^{18}O_P$和δD_P为对应的次降水中氢氧稳定同位素日降水量加权平均值(‰)；$\alpha^{18}_{w\text{-}v}$和$\alpha^{2}_{w\text{-}v}$为降水和水汽氢氧稳定同位素之间的平衡分馏系数，这2个系数与温度(*T*,K)存在如下关系[16]：

$$10^3\ln\alpha^{18}_{w\text{-}v}=1.137\left(\frac{10^6}{T^2}\right)-0.4156\left(\frac{10^3}{T}\right)-2.0667 \quad (5)$$

$$10^3\ln\alpha^{2}_{w\text{-}v}=24.844\left(\frac{10^6}{T^2}\right)-76.248\left(\frac{10^3}{T}\right)+52.612 \quad (6)$$

降水氢氧稳定同位素的加权平均值计算公式如下：

$$\delta_w=\frac{\sum\delta_i\times P_i}{\sum P_i} \quad (7)$$

式中：δ_w为降水量加权平均值(‰)；*i*为降水事件；δ_i为相对应的稳定同位素值(‰)；P_i为相对应的降水量(mm)。

2.2 数据来源及处理

本文所用气象数据为中国气象数据网(https://data.cma.cn)银川和灵武站点的逐小时观测资料，数据经过质量控制，各要素数据的实有率超过99.9%，数据的正确率均接近100%；气团后向轨迹资料使用美国国家环境预报中心(National Centers for Environmental Prediction, NCEP)和美国国家大气研究中心(National Centers for Atmospheric Research, NCAR)提供的全球再分析资料及全球资料同化系统(GDAS)气象要素数据，空间分辨率为2.5°×2.5°。本文在分析降水中δD和$\delta^{18}O$与水汽来源的关系时，将研究期划分为夏半年(5—10月)和冬半年(11月—次年4月)[17]。

2.3 研究方法

2.3.1 降水中$\delta^{18}O$与气温和降水量的关系　气温效应指降水中稳定同位素组成与气温呈正相关关系；而降水量效应指随着降水量的增大，降水中稳定同位素组成与降水量呈负相关关系[18]。本文应用偏相关系数及其*P*值，研究降水中$\delta^{18}O$与气温和降水量之间的相互关系[19]。当降水中$\delta^{18}O$的气温效应和降水量效应同时存在时，气温效应是指当不考虑降水量变化时，$\delta^{18}O$随气温变化的一阶导数；而降水量效应是指不考虑气温变化时，$\delta^{18}O$随降水量变化的一阶导数，并符合二元线性模型：

$$\delta^{18}O=a_0+a_1T_a+a_2P_a+\varepsilon \quad (8)$$

式中：a_1(‰·℃$^{-1}$)和a_2(‰·mm^{-1})为气温效应和降水量效应；a_0为常数项；T_a为平均气温(℃)；P_a为日降水量(mm)；ε为随机误差项。对回归方程进行方差分析和*F*检验，对回归系数进行*t*检验，判断银川平原是否有显著的气温或降水量效应，同时应用回归参数a_1和a_2的偏决定系数定量气温或降水量效应对回归方程的贡献。

2.3.2 降水水汽来源后向轨迹模拟　本文利用已被广泛应用于水汽输送等方面的TrajStat软件[20]，参考以往研究区及周边地区水汽来源的相关研究[21-22]，以银川站为轨迹终点，以6 h间隔(当地时间08:00、14:00、20:00和02:00)模拟降水日的后向轨迹，轨迹模拟的起始高度设置为1500 m、2500 m和5000 m[23]。由于平流层水汽平均停留时间为10 d左右[24-25]，因此将回溯时间设定为240 h(10 d)。因本文只关注水汽输送路径的来向，采用角度距离(Angle distance)算法聚类得到不同时段下主要的水汽输送路径。

2.3.3 潜在源贡献分析法(PSCF)　PSCF是一种基于条件概率函数来识别潜在污染源区的方法[26]。本文利用TrajStat软件提供的PSCF，将水汽输送轨迹经过的区域划分为0.5°×0.5°的水平网格(*i*,*j*)，结合水汽*d*-excess日数据进行分析，并将夏半年水汽*d*-excess平均值0.8‰和冬半年水汽*d*-excess平均值−0.1‰分别设置为阈值[27]，PSCF计算公式为：

$$PSCF_{ij}=\frac{m_{ij}}{n_{ij}} \quad (9)$$

式中：*i*、*j*分别为经度和纬度；n_{ij}为网格(*i*,*j*)内的所有轨迹节点数；m_{ij}为网格(*i*,*j*)内超过平均水汽*d*-excess阈值的轨迹节点数；$PSCF_{ij}$为网格(*i*,*j*)内超过

平均水汽 d-excess 阈值的轨迹出现的概率。

PSCF 值越大，表明网格内水汽输送轨迹对应的下垫面蒸发较其他网格对应的下垫面蒸发更强烈。当 n_{ij} 较小时，PSCF 会有很大的不确定性，因此以某一网格 n_{ij} 小于研究区域内各网格平均滞留时间的3倍为边界，引入权重函数 W_{ij}[28]：

$$W_{ij}=\begin{cases}1.00, & n_{ij}>80\\ 0.70, & 20<n_{ij}\leqslant 80\\ 0.42, & 10<n_{ij}\leqslant 20\\ 0.05, & n_{ij}\leqslant 10\end{cases} \tag{10}$$

对 PSCF 进行加权计算：

$$\mathrm{WPSCF}_{ij}=W_{ij}\times \mathrm{PSCF}_{ij} \tag{11}$$

式中：WPSCF_{ij} 为网格 (i,j) 的 WPSCF 值；WPSCF 值为减少不确定性后的 PSCF 值。

2.3.4 浓度权重轨迹分析法（CWT） PSCF 只反映某个网格中超过平均水汽 d-excess 阈值的轨迹所占的比例，并不体现其对目标网格的降水贡献。CWT 则可以确定水汽的潜在蒸发源区对目标网格的相对贡献大小[29]。通过计算每个网格的水汽 d-excess 权重值定量给出经过该网格的水汽输送轨迹对应的平均权重水汽 d-excess 值，以反映各网格水汽 d-excess 值的大小、潜在蒸发源区和局地再循环水汽对水汽输送轨迹中 d-excess 值的影响状况，计算公式为：

$$\mathrm{CWT}_{ij}=\frac{\sum_{k=1}^{N}C_k\times \alpha_{ijk}}{\sum_{k=1}^{N}\alpha_{ijk}} \tag{12}$$

式中：CWT_{ij} 为网格 (i,j) 上的平均权重水汽 d-excess 值（‰·m^{-3}）；k 为气团轨迹数目；N 为轨迹总数；C_k 为轨迹 k 经过网格 (i,j) 时对应的研究站点水汽 d-excess 值的大小（‰）；α_{ijk} 为轨迹 k 在网格 (i,j) 内的停留时间。PSCF 中所用的权重函数 W_{ij} 同样适用于 CWT，定义 WCWT_{ij} 如下：

$$\mathrm{WCWT}_{ij}=W_{ij}\times \mathrm{CWT}_{ij} \tag{13}$$

式中：WCWT_{ij} 为网格 (i,j) 的权重轨迹水汽 d-excess 值的贡献程度；WCWT 值为减少不确定性后的 CWT 值（‰·m^{-3}）。

3 结果与分析

3.1 降水中稳定同位素的时间变化特征

降水中 δD、δ^{18}O 值的变化范围介于 −123.5‰~22.2‰、−12.8‰~5.0‰，降水量加权平均值分别为 −31.7‰、−4.0‰，d-excess 值的变化范围介于 −37.6‰~17.0‰，降水量加权平均值为 −0.1‰（图2）。降水中稳定同位素值具有明显的季节变化，冬半年降水量加权平均 δ^{18}O 值（−1.2‰）偏正于夏半年的降水量加权平均 δ^{18}O 值（−4.1‰）。与降水中 δ^{18}O 的季节变化相同，冬半年降水量加权平均 d-excess 值（7.5‰）明显偏正于夏半年的降水量加权平均 d-excess 值（−0.5‰）。在夏半年，远距离水汽输送使得降水中稳定同位素值偏负[30]；而在冬半年，水汽来源于湿度小、蒸发强的中高纬度大陆性气团，沿途降水较少，降水中稳定同位素值偏正[31]。银川站夏半年和冬半年的降水量加权平均 δ^{18}O 值（−3.0‰ 和 −0.8‰）均明显偏正于灵武站（−5.1‰ 和 −1.3‰）。与降水中 δ^{18}O 的季节变化相反，灵武站夏半年和冬半年的降水量加权平均 d-excess 值（4.5‰ 和 10.9‰）均显著偏正于银川站（−5.9‰ 和 −1.0‰）。

3.2 局地大气降水线特征

由图3可以看出，银川平原全年局地大气降水线（LMWL），与全球大气降水线（GMWL）相比，其斜率和截距均偏小，原因是研究区地处西北内陆干旱区，雨滴在非饱和大气降落过程中受到比较强烈的二次蒸发效应的影响[32-34]，降水中的稳定同位素发生不平衡分馏，导致重同位素富集，LMWL 的斜率偏小。冬半年 LMWL 的斜率和截距大于夏半年（表2），表明夏半年降水受云下二次蒸发作用的影响程度更大。2个站点 LMWL 的斜率和截距差异明显，与 GMWL 相比斜率和截距均偏小，可能是云下二次蒸发效应的强弱程度和局地水汽再循环作用不同。夏半年 LMWL 的斜率和截距较为接近，而冬半年则差异较大，主要是由于夏半年银川和灵武站点较为干燥的大气环境和较强的蒸发过程；冬半年，水汽来源于湿度小、蒸发强的大陆性气团，沿途降水较少，雨除效应较弱，降水中氢氧稳定同位素值偏正，使得2个地区 LMWL 的斜率和截距偏大。

3.3 气温效应和降水量效应

在全年和夏半年时段下，降水中 δ^{18}O 与平均气温均呈显著的正相关关系（表3）。夏半年时段的气温效应（0.258±0.037）‰·℃$^{-1}$ 大于全年时段的气温效应（0.211±0.031）‰·℃$^{-1}$。然而，在冬半年时段，降水中 δ^{18}O 与平均气温不存在显著的正相关关系，这可能与研究区在该时段下受中高纬度大陆性气团的影响有关。与以往对西北地区及宁夏降水中 δ^{18}O

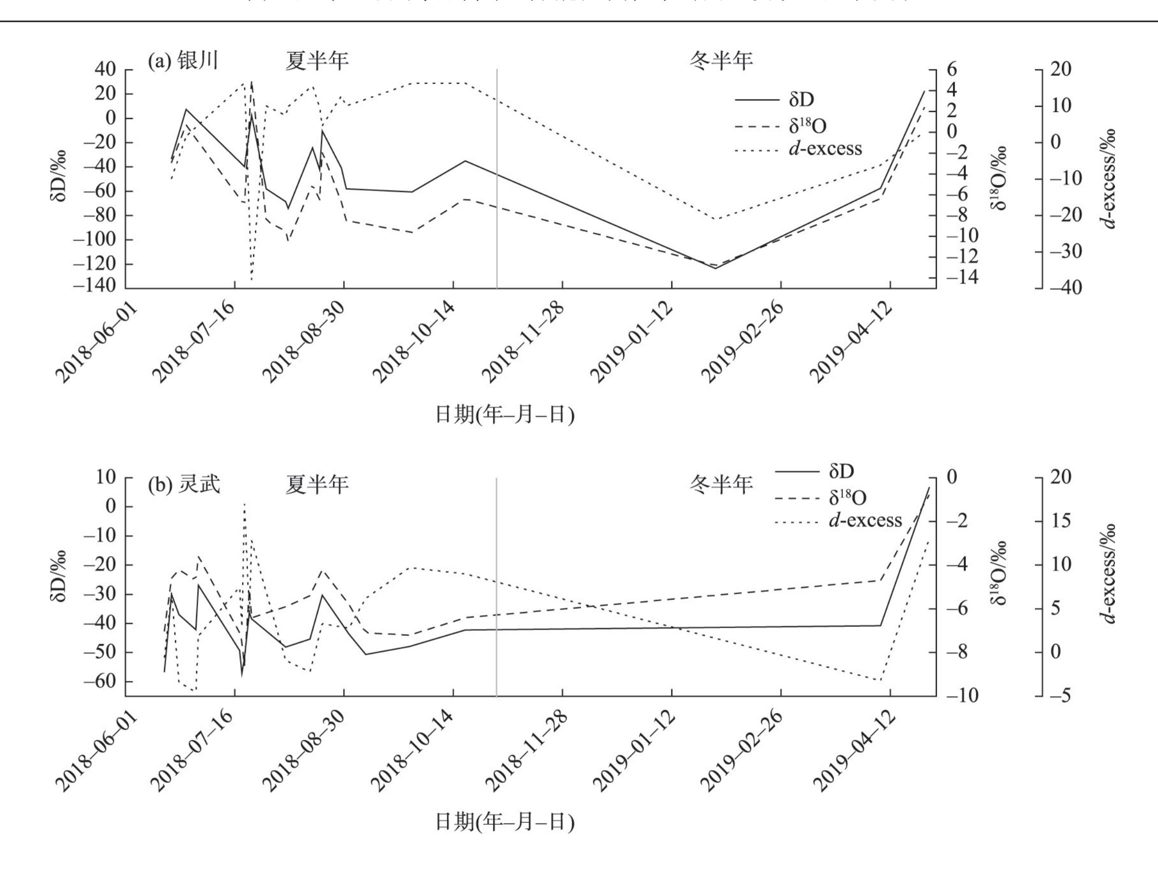
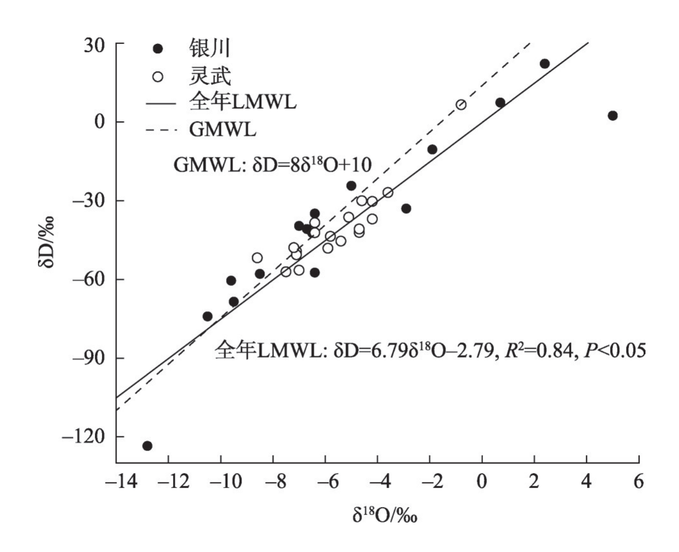


图2　银川平原降水中δD、$\delta^{18}O$和*d*-excess的逐日变化

Fig. 2　Daily variations of δD, $\delta^{18}O$ and *d*-excess in Yinchuan Plain



注：LMWL为局地大气降水线，GMWL为全球大气降水线。

图3　银川平原局地大气降水线

Fig. 3　Local meteoric water line in Yinchuan Plain

与平均气温呈正相关的结论相似[22,35]；在全年和夏半年时段，降水中$\delta^{18}O$与降水量呈正相关关系，降水量效应不显著，可能是由于降水中$\delta^{18}O$与平均气温和降水量之间相互影响。因此，进一步利用偏相关系数，研究降水中$\delta^{18}O$与平均气温和降水量之间的相互关系(表4)。当平均气温保持不变时，3个时段下，降水中$\delta^{18}O$与降水量的相关系数仍然大于0；而当降水量保持不变时，除冬半年以外，全年和夏半年时段降水中$\delta^{18}O$与平均气温仍呈显著的正相关关系，这说明研究区存在显著的气温效应，而在全年、夏半年和冬半年时段下，降水量效应不明显。这可能是银川平原距海较远、大陆性气候显著，受西风气流影响较明显，而来自西太平洋及印度洋的暖湿气流受高山阻挡难以到达，季风对研究区的影响较弱，使得该区域的降水量效应不显著[36]。已有研究发现，在年尺度上，宁夏及银川地区降水量效应不显著[22,37]，但次降水事件尺度上部分区域夏季可能存在一定的降水量效应。

3.4　水汽来源分析

3.4.1　后向轨迹聚类分析　在夏半年(图4a~c)，1500 m高度下西方路径中距离输送的水汽合计占比79.60%，短距离路径输送的局地蒸发水汽占比20.40%，2500 m高度下的水汽输送路径与1500 m高度相似，均以西方路径占主导，其中，中距离水汽输送路径占比85.33%，较1500 m高度增加7.20%，短距离路径输送的局地蒸发水汽仅占14.67%，而5000 m高度下均为西方路径中距离输送的水汽；在

表2 银川平原大气降水线斜率与截距的季节变化

Tab. 2 Seasonal variations of slope and intercept of local meteoric water line in Yinchuan Plain

季节	银川			灵武			银川平原		
	斜率	截距	R^2	斜率	截距	R^2	斜率	截距	R^2
夏半年	5.38	−8.45	0.87	5.52	−10.41	0.71	5.43	−9.71	0.85
冬半年	9.55	0.60	0.99	8.26	7.29	0.94	9.10	5.08	0.96
全年	6.72	−3.60	0.84	7.33	0.58	0.88	6.79	−2.79	0.84

注：R^2为决定系数。下同。

表3 不同时段银川平原降水中$\delta^{18}O$与气温、降水量的相关关系

Tab. 3 Correlation of $\delta^{18}O$ in precipitation with temperature and precipitation in Yinchuan Plain in different periods

季节	T	$T(P_a)$	P_a	$P_a(T)$
夏半年	0.310(0.045)	0.327(0.037)	0.158(0.318)	0.191(0.231)
冬半年	0.848(0.069)	0.790(0.210)	0.588(0.297)	0.351(0.649)
全年	0.320(0.028)	0.319(0.031)	0.151(0.311)	0.149(0.323)

注：$T(P_a)$表示当保持降水量(P_a)不变时，降水中$\delta^{18}O$与T的相关系数；$P_a(T)$表示当温度(T)不变时，降水中$\delta^{18}O$与P_a的相关系数。对于T，P值是拒绝假设相关系数小于零的概率；对于P_a，P值是指拒绝假设相关系数大于零的概率。

表4 不同时段银川平原降水中$\delta^{18}O$与气温和降水量的二元线性回归

Tab. 4 Binary linear regression of $\delta^{18}O$ in precipitation with temperature and precipitation in Yinchuan Plain in different periods

季节	常数项	气温效应	气温效应偏决定系数	RMSE	R^2	F
夏半年	−11.402	0.258±0.037*	0.324	3.905	0.085	2.899
冬半年	−10.533±0.075	0.473±0.210	0.740	4.056	0.508	3.067
全年	−9.990	0.211±0.031*	0.315	4.052	0.082	3.061

注：RMSE为均方根误差，F为方差齐性检验；*表示在0.05水平上显著相关。

冬半年(图4d~f)，1500 m高度下西方路径中距离输送的水汽合计占比92.73%，而北方路径短距离输送的局地蒸发水汽仅占7.27%，2500 m高度下西方路径长距离输送的水汽占比22.02%，中距离输送占比73.13%，相比1500 m高度减少21.14%，短距离输送占比2.77%，北方路径占2.08%，5000 m高度下均为西方路径长距离输送的水汽，水汽输送路径较1500 m和2500 m更为集中。在夏半年和冬半年，银川站降水的水汽来源主要为西风水汽，同时受局地蒸发水汽的影响，这与张百娟等[23]的研究结果一致，其中在冬半年受西风水汽的影响更显著，局地蒸发水的影响相比夏半年有所减弱。

3.4.2 PSCF分析 在夏半年(图5a~c)，1500 m高度下WPSCF大于0.8的高值区域主要分布在研究区西部，2500 m高度下WPSCF值在0.4~0.5的潜在贡献源区面积明显缩小，主要分布在研究区南部，此外，东南部潜在源区的贡献率也较高，而5000 m高度下大于0.4的高值区域明显增多，主要分布在研究区西南部，另外，东部区域也有一定贡献；在冬半年(图5d~f)，1500 m高度下大于0.9的高值区域范围较大，延伸路径较远，主要分布在研究区周边地区和西部，2500 m高度下WPSCF大于0.9的高值区域面积明显缩小，且向南迁移，主要分布在研究区周围及西部区域，5000 m高度下WPSCF大于0.9的高值区域面积持续缩小且分布集中，主要分布在研究区周边地区和西部，相比1500 m和2500 m高度，西方路径区域水汽传输对研究区降水的影响可能减弱。

3.4.3 CWT分析 在夏半年(图6a~c)，1500 m高度下WCWT值超过6 ‰·m^{-3}的区域主要分布在研究区西部，研究区东部也有一定贡献，2500 m高度下WCWT值超过6 ‰·m^{-3}的区域主要分布在西南部，而研究区西部大于8 ‰·m^{-3}的高值区域显著缩小，5000 m高度下WCWT值大于3 ‰·m^{-3}的高值区显著增大且分布较集中，主要分布在研究区西部，其次是东部；在冬半年(图6d~f)，1500 m高度下无明显高值区域，2500 m高度下大于−3 ‰·m^{-3}的区域显

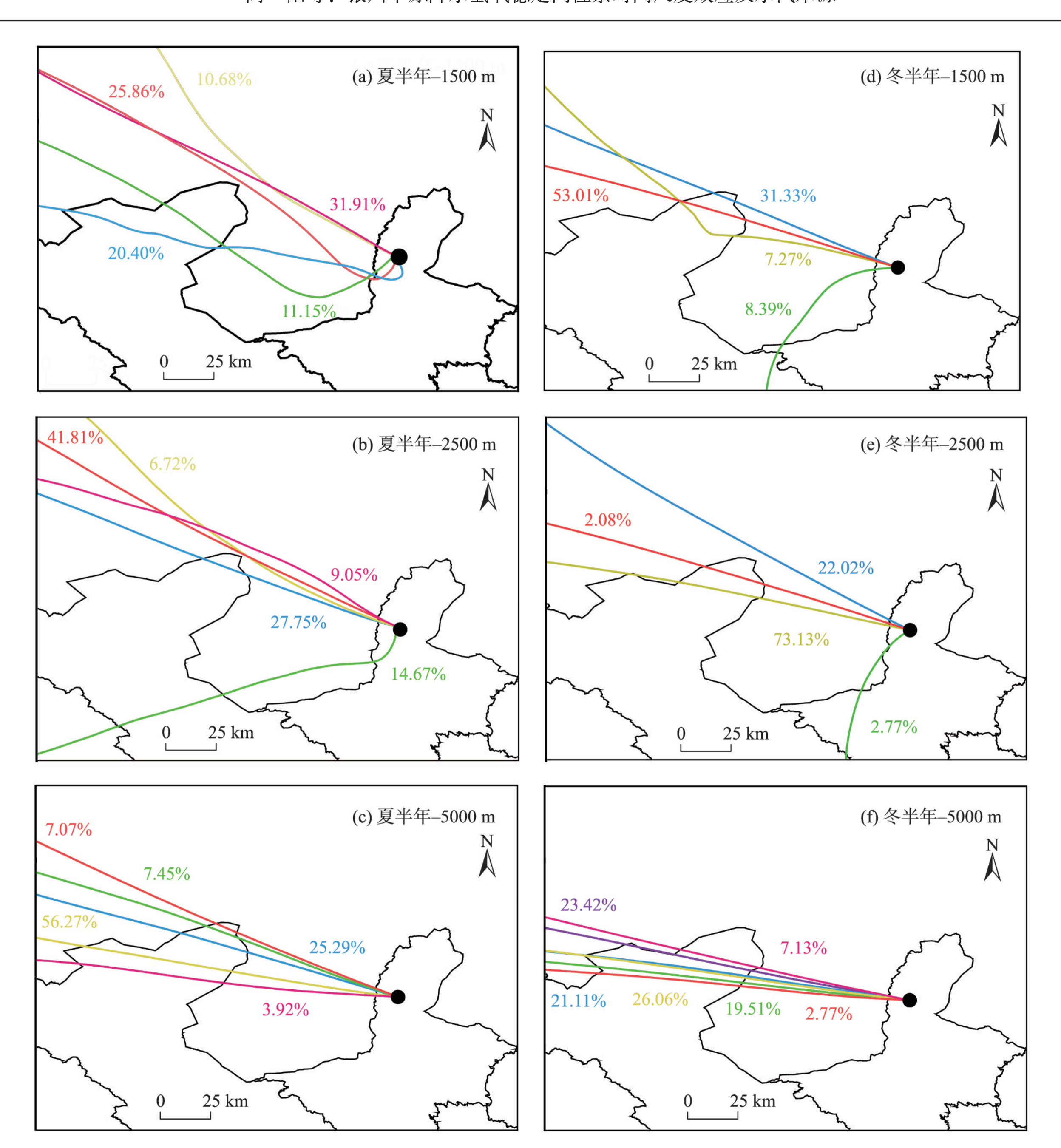


图4　银川平原降水水汽来源后向轨迹聚类

Fig. 4　Backward trajectories cluster of moisture source in Yinchuan Plain

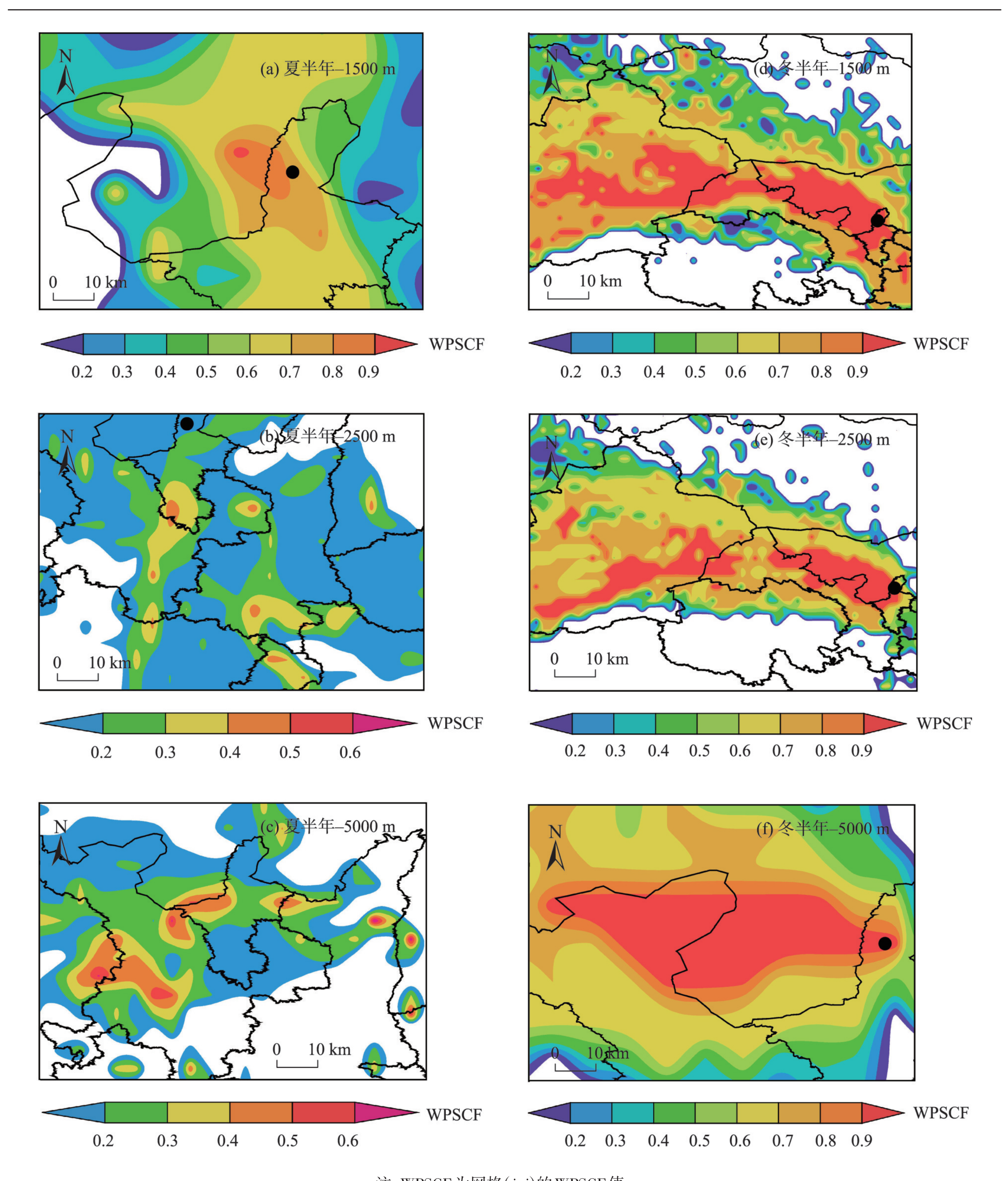
著增大，主要分布在研究区周边地区，此外，研究区西南部也有一定贡献，而5000 m高度下大于0.1 ‰·m^{-3}区域显著缩小，且分布较分散，主要分布在研究区西部。

4　结 论

本文通过研究银川平原不同时段下降水中稳定同位素主要的环境效应、水汽来源、潜在蒸发源区及其贡献程度，得出以下主要结论：

（1）银川平原降水氢氧稳定同位素组成存在明显的季节性变化，冬半年降水氢氧稳定同位素组成（−38.6‰±51.6‰和−4.5‰±5.2‰）明显偏正于夏半年（−40.9‰±17.7‰和−5.7‰±3.0‰）；不同时段下，夏半年LMWL的斜率、截距（5.43、−9.71）低于冬半年LMWL的斜率、截距（9.10、5.08）和银川平原全年LMWL的斜率、截距（6.79、−2.79）。

（2）在全年、夏半年和冬半年3个时段下，扣除降水量的影响，降水中$\delta^{18}O$与平均气温仍呈正相关



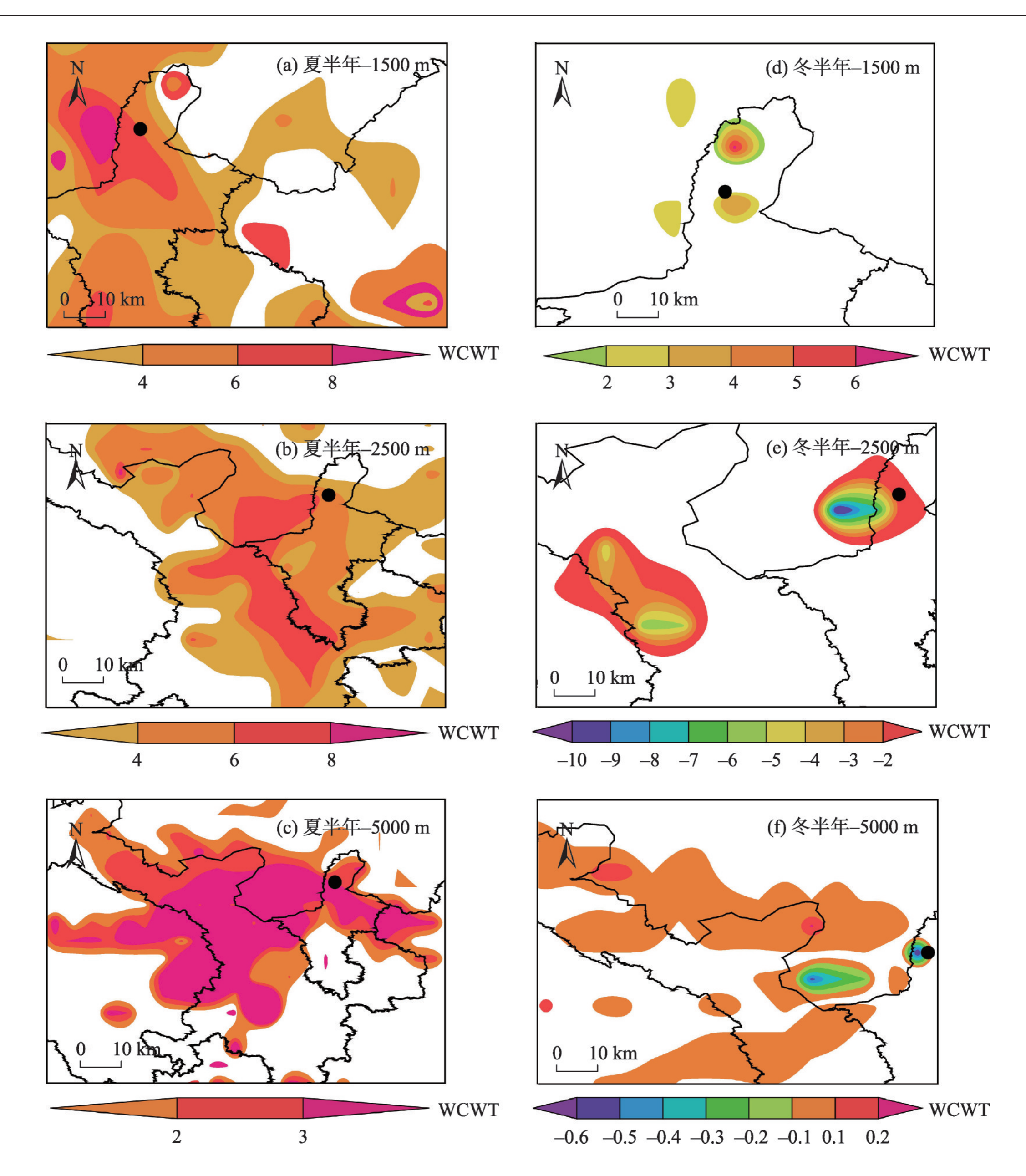
注：WPSCF为网格(i,j)的WPSCF值。

图5 银川平原夏半年和冬半年WPSCF分布

Fig. 5 Distribution of WPSCF in Yinchuan Plain during the summer and winter half-year

关系，气温效应分别为(0.473±0.210)‰·℃$^{-1}$、(0.258±0.037)‰·℃$^{-1}$和(0.211±0.031)‰·℃$^{-1}$；扣除气温的影响，3个时段下，降水中$\delta^{18}O$与降水量仍呈正相关关系，说明降水量对降水中$\delta^{18}O$的影响不明显，降水量效应不显著。

(3) 夏半年和冬半年，研究区降水受西风水汽影响显著，同时受局地蒸发水汽的影响。夏半年，研究区周边地区及西部、西南部和南部是主要的水汽潜在蒸发源区；冬半年，研究区周边地区和西部是主要的水汽潜在蒸发源区。



注：WCWT为网格(i,j)的权重轨迹水汽贡献程度。

图6　银川平原夏半年和冬半年WCWT分布

Fig. 6　Distribution of WCWT in Yinchuan Plain during the summer and winter half-year

参考文献(References)

[1] 汪芳, 苗长虹, 刘峰贵, 等. 黄河流域人居环境的地方性与适应性: 挑战和机遇[J]. 自然资源学报, 2021, 36(1): 1–26. [Wang Fang, Miao Changhong, Liu Fenggui, et al. The locality and adaptability of human settlements in the Yellow River Basin: Challenges and opportunities[J]. Journal of Natural Resources, 2021, 36(1): 1–26.]

[2] Gui J, Li Z X, Feng Q, et al. Environmental effect and spatiotemporal pattern of stable isotopes in precipitation on the transition zone between the Tibetan Plateau and arid region[J]. Science of the Total Environment, 2020, 749: 141559, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.141559.

[3] 范广群, 张德忠, 张建明, 等. 银川平原水体氢氧同位素及主要水化学参数特征[J]. 干旱区研究, 2018, 35(5): 1040–1049. [Fan Guangqun, Zhang Dezhong, Zhang Jianming, et al. Hydrogen and oxygen isotopic and hydrochemical characteristics of water in Yinchuan Plain[J]. Arid Zone Research, 2018, 35(5): 1040–1049.]

[4] 郝帅, 李发东, 李艳红, 等. 艾比湖流域降水、地表水和地下水稳定同位素特征[J]. 干旱区地理, 2021, 44(4): 934–942. [Hao Shuai, Li Fadong, Li Yanhong, et al. Stable isotopes characteristics of precipitation, surface water and groundwater in Ebinur Lake Basin[J]. Arid Land Geography, 2021, 44(4): 934–942.]

[5] 王邺凡, 余武生, 张寅生, 等. 印度河上游Bagrot山谷降水稳定

同位素变化及与水汽来源的关系[J]. 干旱区地理, 2019, 42(2): 252−262. [Wang Yefan, Yu Wusheng, Zhang Yinsheng, et al. Precipitation stable isotope variation and its relationship with moisture sources in Bagrot Valley of upper Indus Basin[J]. Arid Land Geography, 2019, 42(2): 252−262.]

[6] 马兴刚, 贾文雄, 丁丹, 等. 祁连山东部大气降水$\delta^{17}O$变化特征及水汽输送[J]. 干旱区地理, 2019, 42(3): 517−525. [Ma Xinggang, Jia Wenxiong, Ding Dan, et al. Variation characteristics of $\delta^{17}O$ in precipitation and moisture transports in eastern Qilian Mountains[J]. Arid Land Geography, 2019, 42(3): 517−525.]

[7] 常昕, 章新平, 戴军杰, 等. 不同时间尺度氢氧稳定同位素效应的比较——以长沙降水为例[J]. 第四纪研究, 2021, 41(1): 99−110. [Chang Xin, Zhang Xinping, Dai Junjie, et al. Comparison of stable isotope effects under different time scales: Taking Changsha as an example[J]. Quaternary Sciences, 2021, 41(1): 99−110.]

[8] Salamalikis V, Argiriou A A, Dotsika E. Stable isotopic composition of atmospheric water vapor in Patras, Greece: A concentration weighted trajectory approach[J]. Atmospheric Research, 2015, 152: 93−104.

[9] 孟鸿飞, 张明军, 王圣杰, 等. 黑河上游降水同位素特征及其水汽来源分析[J]. 冰川冻土, 2020, 42(3): 937−951. [Meng Hongfei, Zhang Mingjun, Wang Shengjie, et al. Precipitation isotope characteristics and water vapor source analysis in the upper reaches of the Heihe River[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2020, 42(3): 937−951.]

[10] 马洪云, 李成柱, 王化齐, 等. 银川盆地水体氢氧稳定同位素特征分析[J]. 西北地质, 2019, 52(2): 218−226. [Ma Hongyun, Li Chengzhu, Wang Huaqi, et al. Hydrogen and oxygen isotopic compositions of water bodies at Yinchuan Basin, China[J]. Northwestern Geology, 2019, 52(2): 218−226.]

[11] 李晓明, 孙从建, 孙九林, 等. 基于遥感信息的黄土高原主要灌溉农业分布区生态安全特征[J]. 应用生态学报, 2021, 32(9): 3177−3184. [Li Xiaoming, Sun Congjian, Sun Jiulin, et al. Ecological security characteristics of mainly irrigated agricultural areas on the Loess Plateau based on remote sensing information[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2021, 32(9): 3177−3184.]

[12] GB/T13580.2−1992. 大气降水样品的采集与保存[S]. 北京: 国家环境保护局, 国家技术监督局, 1993. [GB/T13580.2−1992. Collection and preservation of the wet precipitation sample[S]. Beijing: The State Bureau of Environment and Protection, The State Bureau of Quality and Technical Supervision, 1993.]

[13] 张自超, 丁悌平. 关于同位素地质测试数据的数据处理及结果表示[J]. 岩矿测试, 2000, 19(1): 77−79. [Zhang Zichao, Ding Tiping. Data processing and expression for analytical results in isotope geology[J]. Rock and Mineral Analysis, 2000, 19(1): 77−79.]

[14] Dansgaard W. Stable isotopes in precipitation[J]. Tellus, 1964, 16(4): 436−468.

[15] Peng T R, Liu K K, Wang C H, et al. A water isotope approach to assessing moisture recycling in the island-based precipitation of Taiwan: A case study in the western Pacific[J]. Water Resources Research, 2011, 47(8): 1−11.

[16] Friedman I, O' Neil J R. Compilation of stable isotope fractionation factors of geochemical interest[M]. US: Department of the Interior, 1977, 1−12.

[17] 郭小燕, 冯起, 李宗省, 等. 敦煌盆地降水稳定同位素特征及水汽来源[J]. 中国沙漠, 2015, 35(3): 715−723. [Guo Xiaoyan, Feng Qi, Li Zongxing, et al. Variation of stable isotopes and moisture sources in precipitation at the Dunhuang Basin in northwest China [J]. Journal of Desert Research, 2015, 35(3): 715−723.]

[18] 柳鉴容, 宋献方, 袁国富, 等. 中国东部季风区大气降水$\delta^{18}O$的特征及水汽来源[J]. 科学通报, 2009, 54(22): 3521−3531. [Liu Jianrong, Song Xianfang, Yuan Guofu, et al. Characteristics of $\delta^{18}O$ in precipitation over eastern monsoon China and the water vapor sources[J]. Chinese Science Bulletin, 2009, 54(22): 3521−3531.]

[19] 郑新军, 李彦, 徐利岗. 乌鲁木齐降水中$\delta^{18}O$的温度和降水强度效应的季节转换[J]. 中国沙漠, 2016, 36(2): 491−498. [Zheng Xinjun, Li Yan, Xu Ligang. Seasonal transition between temperature and precipitation intensity effect on precipitation $\delta^{18}O$ in Urumqi, China[J]. Journal of Desert Research, 2016, 36(2): 491−498.]

[20] Wang Y Q. MeteoInfo: GIS software for meteorological data visualization and analysis[J]. Meteorological Applications, 2014, 21(2): 360−368.

[21] 李江萍, 杜亮亮, 张宇, 等. 玛曲地区夏季强降水的环流分型及水汽轨迹分析[J]. 高原气象, 2012, 31(6): 1582−1590. [Li Jiangping, Du Liangliang, Zhang Yu, et al. Analysis on circulation pattern and water vapor source of heavy precipitation in Maqu Region [J]. Plateau Meteorology, 2012, 31(6): 1582−1590.]

[22] 刘洁遥, 张福平, 冯起, 等. 陕甘宁地区降水稳定同位素特征及水汽来源[J]. 应用生态学报, 2019, 30(7): 2191−2200. [Liu Jieyao, Zhang Fuping, Feng Qi, et al. Stable isotopes characteristics of precipitation over Shaanxi-Gansu-Ningxia and its water vapor sources[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2019, 30(7): 2191−2200.]

[23] 张百娟, 李宗省, 王昱, 等. 祁连山北坡中段降水稳定同位素特征及水汽来源分析[J]. 环境科学, 2019, 40(12): 5272−5285. [Zhang Baijuan, Li Zongxing, Wang Yu, et al. Characteristics of stable isotopes and analysis of water vapor sources of precipitation at the northern slope of the Qilian Mountains[J]. Environmental Science, 2019, 40(12): 5272−5285.]

[24] Gat J R. Atmospheric water balance: The isotopic perspective[J]. Hydrological Processes, 2015, 14(8): 1357−1369.

[25] Trenberth K E. Atmospheric moisture residence times and cycling: Implications for rainfall rates and climate change[J]. Climatic Change, 1998, 39(4): 667−694.

[26] Chanmin K, Lucas R F H, Christine C, et al. Health effects of power plant emissions through ambient air quality[J]. Journal of the

Royal Statistical Society: Series A (Statistics in Society), 2020, 183 (4): 1677-1703.

[27] 陈虹颖, 赵新锋, 何志东, 等. 2000—2016年珠海市酸雨变化特征及酸雨概念模型[J]. 环境科学学报, 2020, 40(6): 1998-2006. [Chen Hongying, Zhao Xinfeng, He Zhidong, et al. Variation characteristics and concept model of acid rain in Zhuhai City during 2000 to 2016[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2020, 40(6): 1998-2006.]

[28] Polissar A V, Hopke P K, Harris J M. Source regions for atmospheric aerosol measured at Barrow, Alaska[J]. Environmental Science & Technology, 2001, 35(21): 4214-4226.

[29] Hsu Y K, Holsen T M, Hopke P K. Comparison of hybrid receptor models to locate PCB sources in Chicago[J]. Atmospheric Environment, 2003, 37(4): 545-562.

[30] 任行阔, 高晶, 杨育龙, 等. 慕士塔格地区大气水汽氢氧稳定同位素季节内变化特征及影响因素分析[J]. 冰川冻土, 2021, 43(2): 331-341. [Ren Xingkuo, Gao Jing, Yang Yulong, et al. Intraseasonal characteristics of atmospheric water vapor stable isotopes at Muztagata and its climate controls[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2021, 43(2): 331-341.]

[31] 胡勇博, 肖薇, 钱雨妃, 等. 水汽源地和局地蒸发对大气降水氢氧稳定同位素组分的影响[J]. 环境科学, 2019, 40(2): 573-581. [Hu Yongbo, Xiao Wei, Qian Yufei, et al. Effects of water vapor source and local evaporation on the stable hydrogen and oxygen isotopic compositions of precipitation[J]. Environmental Science, 2019, 40(2): 573-581.]

[32] 陈粉丽, 张明军, 马潜, 等. 兰州及其周边区域大气降水$\delta^{18}O$特征及其水汽来源[J]. 环境科学, 2013, 34(10): 3755-3763. [Chen Fenli, Zhang Mingjun, Ma Qian, et al. Characteristics of $\delta^{18}O$ in precipitation and water vapor sources in Lanzhou City and its surrounding area[J]. Environmental Science, 2013, 34(10): 3755-3763.]

[33] 王家鑫, 张明军, 张宇, 等. 基于稳定同位素示踪的黄河兰州段河漫滩土壤水特征分析[J]. 干旱区地理, 2021, 44(5): 1449-1458. [Wang Jiaxin, Zhang Mingjun, Zhang Yu, et al. Soil water characteristics analysis of floodplain in the Yellow River reach of Lanzhou based on stable isotopes tracing[J]. Arid Land Geography, 2021, 44(5): 1449-1458.

[34] 车存伟, 张明军, 王圣杰, 等. 黄河流域降水稳定同位素的云下二次蒸发效应[J]. 干旱区地理, 2019, 42(4): 790-798. [Che Cunwei, Zhang Mingjun, Wang Shengjie, et al. Influence of sub-cloud secondary evaporation on stable isotope composition in precipitation in the Yellow River Basin[J]. Arid Land Geography, 2019, 42 (4): 790-798.]

[35] 李小飞, 张明军, 李亚举, 等. 西北干旱区降水中$\delta^{18}O$变化特征及其水汽输送[J]. 环境科学, 2012, 33(3): 711-719. [Li Xiaofei, Zhang Mingjun, Li Yaju, et al. Characteristics of $\delta^{18}O$ in precipitation and moisture transports over the arid region in northwest China[J]. Environmental Science, 2012, 33(3): 711-719.]

[36] 孙从建, 张子宇, 陈伟, 等. 亚洲中部高山降水稳定同位素空间分布特征[J]. 干旱区研究, 2019, 36(1): 19-28. [Sun Congjian, Zhang Ziyu, Chen Wei, et al. Spatial distribution of precipitation stable isotopes in the alpine zones in Central Asia[J]. Arid Zone Research, 2019, 36(1): 19-28.]

[37] 刘宏伟, 徐明, 管清浩. 银川地区大气降水中氢氧稳定同位素的变化特征及影响因素分析[J]. 水科学与工程技术, 2012(1): 88-90. [Liu Hongwei, Xu Ming, Guan Qinghao. Variation characteristics and influencing factors of hydrogen-oxygen stable isotope in precipitation of Yinchuan Area[J]. Water Sciences and Engineering Technology, 2012(1): 88-90.]

Time scale effect of hydrogen and oxygen stable isotopes in precipitation and source of water vapor in Yinchuan Plain

GAO Yang[1], HAN Lei[1,2,3], HAN Yonggui[1], HUANG Xiaoyu[1], PENG Ling[4], LIU Lili[1]

(1. School of Geography and Planning, Ningxia University, Yinchuan 750021, Ningxia, China; 2. Joint International Research Laboratory of China-Arab Featured Resources and Environmental Governance in Arid Region, Yinchuan 750021, Ningxia, China; 3. Ningxia Key Laboratory of Resource Assessment and Environment Regulation in Arid Region, Yinchuan 750021, Ningxia, China; 4. School of Agriculture, Ningxia University, Yinchuan 750021, Ningxia, China)

Abstract: The environmental effects of stable isotope and water vapor precipitation sources in the Yinchuan Plain, Ningxia Hui Autonomous Region, China, were studied using backward trajectory clustering analysis, the potential source contribution function, and the concentration-weighted trajectory analysis method to resolve vapor sources and potential evaporation source areas. Our results showed that (1) there were obvious seasonal variations in the hydrogen-oxygen stable isotope composition of precipitation in the Yinchuan Plain, and the hydrogen-oxygen stable isotope composition of precipitation in the winter half-year (−38.6‰±51.6‰ and −4.5‰±5.2‰) was significantly more positive than that in the summer half-year (−40.9‰±17.7‰ and −5.7‰±3.0‰); The local meteoric water line was greatly improved. The slope and intercept of the LMWL in the summer half-year (5.43, −9.71) were lower than that in the winter half-year (9.10, 5.08), and that of the whole year (6.79, −2.79). (2) The temperature effect was significant at three time periods: (0.473±0.210) ‰·°C^{-1}, (0.258±0.037)‰·°C^{-1} and (0.211±0.031)‰·C^{-1} under the entire year, summer and winter half-year, respectively, the precipitation effect was not significant. (3) During the summer and winter half-years, the vapor sources of precipitation in the study area were primarily westerly water vapor, but were also influenced by local evaporative vapor. In the summer half-year, the evaporative vapor source areas were mainly distributed in the area surrounding the study area and the western, southwestern, and southern parts of the study area; During the winter half-year, they were mostly found in the area surrounding the study area and to the west. The study's findings may provide a theoretical foundation for selecting methods for identifying water vapor sources in arid regions using stable isotope techniques.

Key words: atmospheric precipitation; stable isotope effect; water vapor source; potential evaporation source; different time scales; Yinchuan Plain